

**ANALISIS PENGARUH TAHANAN ISOLASI AKIBAT  
PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT UMUR  
TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK PEMALANG**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I  
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

**Oleh:**

**SLAMET WURYOGO**

**D400150024**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

**2019**

**HALAMAN PERSETUJUAN**

**ANALISIS PENGARUH TAHANAN ISOLASI AKIBAT PEMBEBANAN  
TERHADAP SUSUT UMUR TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK  
PEMALANG**

**PUBLIKASI ILMIAH**

oleh:

**SLAMET WURYOGO**

**D400150024**

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing

*acc 11/1-2019*



**Aris Budiman, S.T.,M.T**

**NIK. 885**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**ANALISIS PENGARUH TAHANAN ISOLASI AKIBAT PEMBEBANAN  
TERHADAP SUSUT UMUR TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK  
PEMALANG**

**OLEH**

**SLAMET WURYOGO**

**D40150024**

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
Fakultas Teknik Elektro  
Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Pada hari Rabu 24 Juli 2019  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

**Dewan Penguji:**

1. Aris Budiman, S.T, M.T.

(Ketua Dewan Penguji)

(.....)

2. Ir. Jatmiko, M.T.

(Anggota I Dewan Penguji)

(.....)

3. Hasyim Asy'ari, S.T, M.T.

(Anggota II Dewan Penguji)

(.....)

**Dekan,**



**Ir. Sri Sunariono, M.T., Ph.D**

**NIK. 682**

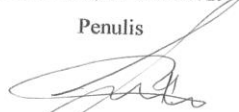
## **PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam naskah publikasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 11 Juni 2019

Penulis



**SLAMET WURYOGO**

**D400150024**

## **ANALISIS PENGARUH TAHANAN ISOLASI AKIBAT PEMBEBANAN TERHADAP SUSUT UMUR TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK PEMALANG**

### **Abstrak**

Transformator merupakan suatu peralatan penting dalam sistem tenaga listrik yang digunakan untuk mengubah tegangan arus bolak balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain. Oleh karena itu transformator harus selalu diadakan perawatan supaya untuk menjaga kualitas dan memperlambat susut umur. Berbagai faktor yang dapat mempengaruhi susut umur transformator, antara lain adalah kandungan isolasi transformator, pembebanan, suhu transformator dan suhu *ambien* (suhu lingkungan). Penelitian ini bertujuan untuk mencari pengaruh kandungan isolasi minyak trafo terhadap susut umurnya dengan mengkaitkan perhitungan beberapa faktor diantaranya, suhu *ambien* (suhu lingkungan), pembebanan transformator dan sistem pendingin pada transformator. Berdasarkan penelitian dengan menggunakan analisis IEEE standard C57-104.2008 dan Key Gas kandungan isolasi minyak pada transformator unit 3 gardu induk Pemalang terindikasi *Overheating of cellulose* (pemanasan isolasi kertas) sehingga mempengaruhi kinerja transformator. Hasil penelitian menunjukkan temperatur hotspot tertinggi pada saat mode ONAN yaitu 90°C dengan pembebanan 90% dan mode ONAF yaitu 77,6°C pada saat pembebanan 41% dalam hal ini transformator masih aman untuk beroperasi karena temperatur hotspot masih dibawah batas standard IEC345 tahun 1991 yaitu sebesar 98°C. Pengaruh suhu lingkungan (suhu *ambient*) di gardu induk Pemalang yang berubah dari 25°C pada malam sampai 32°C pada siang hari, hal ini mengakibatkan susut umur tranformator daya unit 3 di gardu induk Pemalang saat ONAN pada pembebanan 68% sebesar 0,84 jam dan pada pembebanan 90% sebesar 1,17 jam, sedangkan saat ONAF pada pembebanan 41% sebesar 0,27 jam dan pada pembebanan 54% sebesar 0,12 jam. Pembebanan terburuk sebesar 90% mode ONAN tanpa mode ONAF beroperasi hal ini dapat mengakibatkan laju penuaan thermal bertambah cepat dan umur transformator yaitu 14,5 tahun. Beban puncak bulan Maret masih terbilang rendah sebesar 54% untuk mode ONAN/ONAF beroperasi dengan suhu *ambien* 25°C, maka transformator dapat berumur 141,6 tahun.

**Kata Kunci:** transformator, isolasi trafo, temperatur lingkungan, susut umur.

### **Abstract**

Transformer is an important equipment in an electric power system that is used to convert alternating current voltage from one level to another level. Therefore, the transformer must always be maintained so as to maintain quality and slow down aging. Various factors that can affect the transformer lifespan include the contents of the transformer insulation, loading, transformer temperature and ambient temperature (ambient temperature). This study aims to find the effect of the content of transformer oil isolation on its age shrinkage by linking the calculation of several factors including, ambient temperature (ambient temperature), load transformer and

cooling system on the transformer. Based on the research using IEEE C57-104.2008 standard analysis and Key Gas oil isolation content on the transformer unit 3 Pemalang substations indicated Overheating of cellulose (heating insulation paper) so that it affected the performance of the transformer. The results showed the highest hotspot temperature when ONAN mode is 90°C with 90% loading and ONAF mode that is 77.6°C at the time of 41% loading in this case the transformer is still safe to operate because the hotspot temperature is still below the IEC345 standard limit in 1991 which is equal to 98°C. The effect of environmental temperature (ambient temperature) on the Pemalang substation that changes from 25°C at night to 32°C during the day, this results in unit 3 power transformer shrinkage at the Pemalang when ONAN substation at 68% loading of 0.84 hours and at 90% loading at 1.17 hours, while ONAF at 41% loading at 0.27 hours and at loading 54% at 0.12 hours. The worst loading of 90% ONAN mode without ONAF mode operates this can result in a faster thermal aging rate and the age of the transformator is 14.5 years. The peak load in March is still relatively low at 54% for ONAN / ONAF mode operating with an ambient temperature of 25°C, the transformer can be 141.6 years.

**Keywords:** transformer, isolation transformer, ambient temperature, aging.

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang kian pesat menjadikan peranan listrik sangat penting dalam kehidupan masyarakat. Kebutuhan akan ketersediaan energi listrik semakin meningkat dengan adanya perkembangan teknologi peralatan rumah maupun industri yang menggunakan energi listrik sebagai sumber pembangkit, sehingga untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit kepada konsumen diperlukan sistem yang handal.

Salah satu peralatan terpenting dalam sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik dari satu sirkuit ke sirkuit yang lain yang beroperasi dengan menggunakan induksi magnetoelektrik adalah transformator. ANSI/IEEE mendefinisikan transformator sebagai perangkat listrik statis, digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mentransfer daya antar sirkuit melalui penggunaan elektromagnetik induksi (Harlow, 2011). Transformator yang digunakan di sistem tenaga listrik berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai kebutuhan konsumen tanpa merubah frekuensi (S.A.Khaparde, 2004).

Gangguan yang sering umum terjadi pada transformator saat beroperasi adalah timbulnya kegagalan isolasi minyak transformator yang disebabkan oleh pergantian suhu akibat pembebanan dan suhu *ambien* (suhu lingkungan) pada transformator (Muzar, 2018). Pengoperasian pada kondisi beban 100% secara terus menerus, akan timbul titik-titik panas yang biasa disebut temperatur *hot spot*. Apabila hal ini dibiarkan akan menyebabkan perubahan komposisi isolasi minyak dan kehilangan sifat isolasinya. Keberadaan isolasi sangat penting karena berfungsi sebagai pemisah antara bagian kumparan transformator, isolasi tersebut berfungsi sebagai pendingin transformator sehingga dapat meminimalisir panas yang dapat menyebabkan susut umur transformator terlalu cepat (Setiawan, 2013).

Menurut standar IEC354, sebuah transformator mengalami umur yang normal pada kondisi suhu *hot spot* dibawah batas 98°C dengan pembebanan terus-menerus. Apabila transformator mengalami suhu *hot spot* melampaui 98°C, maka transformator tersebut akan mengalami susut umur yang begitu cepat (IEC354, 1991). Selain itu IEC yang diterbitkan tahun 1968, membatasi suhu *hot spot* 140°C apabila kondisi beban *overload* (Tanguy, 2004). Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi susut umur transformator diantaranya kualitas minyak, suhu minyak, pola pembebanan, pengaruh suhu sekitar, cuaca, kadar oksigen, dan kelembaban (Muzar, 2018).

## **2. METODE**

### **2.1 Rancangan Penelitian**

Rancangan dalam penelitian ini digunakan untuk menggambarkan suatu langkah-langkah yang akan dilakukan dalam sebuah penelitian. Agar tujuan dapat tercapai, penulis memaparkan rancangan penelitian sebagai berikut:

#### **1) Lokasi dan jadwal penelitian**

Menentukan lokasi pada penelitian ini, yaitu di gardu induk Pemalang 150 kV. Setelah itu, merencanakan jadwal penelitian agar penelitian dapat dilaksanakan dengan baik.

## 2) Studi literatur

Mengumpulkan studi kasus yang terkait materi penelitian, dan mempelajari materi dari buku referensi, artikel, jurnal ilmiah serta melakukan wawancara dengan narasumber bertujuan menambah referensi dari penelitian yang dilakukan.

## 3) Perijinan dan Pengambilan data

Melakukan perijinan kepada PT.PLN (persero) APP Purwokerto di gardu induk Pemalang, selanjutnya dilakukan pengambilan data meliputi pembebanan, arus, suhu kumparan, suhu minyak atas, temperatur lingkungan, kandungan isolasi minyak, dan spesifikasi transformator dari pengujian yang sudah dilakukan oleh PLN. Pengambilan data bertujuan untuk memperoleh informasi yang berhubungan dengan penelitian ini, setelah itu dapat dilakukan analisis data.

## 4) Analisis data

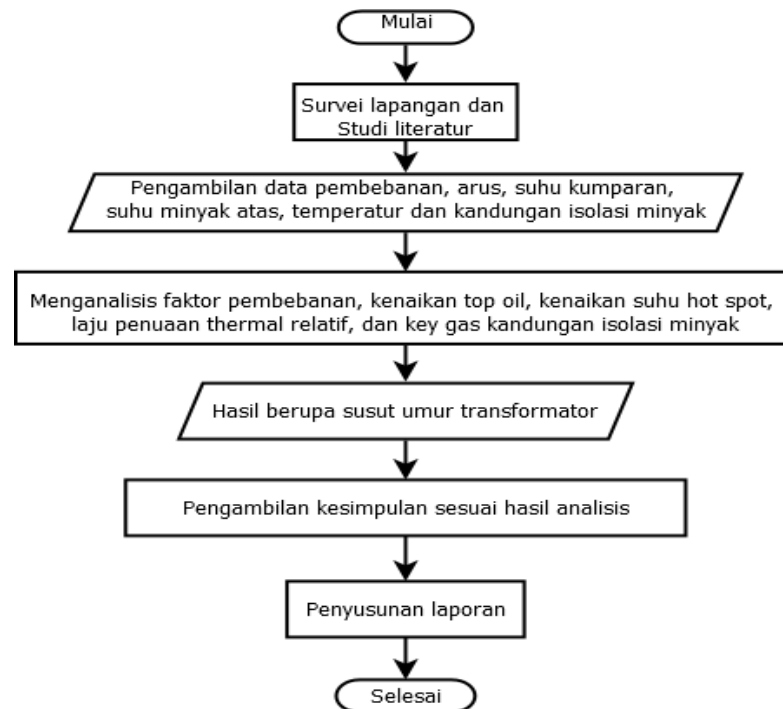
Melakukan analisis hasil data pengujian menggunakan perhitungan manual dengan percobaan pembebanan dan suhu lingkungan yang bervariasi agar dapat membandingkan perkiraan susut umur transformator tersebut, serta melakukan analisis kandungan isolasi minyak dengan menggunakan metode literatur yang penulis pelajari.

## 5) Kesimpulan

Kesimpulan sebagai tahap akhir untuk menyusun laporan dari proses penelitian dengan menggunakan acuan hasil analisis data.



## 2.2 Flowchart Penelitian



Gambar 1. Flowchart Penelitian

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Data Masukan

#### 1) Data Transformator unit 3

Design nomor	: 814-06	Tahun pembuatan	: 2016
Daya Pengenal	: 36/60MVA	Tegangan Primer	: 150 kV
Standard	: IEC 60076	Tegangan Sekunder	: 20 kV
Jenis Pendingin	: ONAN / ONAF	Rugi Beban nol	: 30 kW

#### 2) Data Temperatur

Temperatur Siang	: 32°C
Temperatur Malam	: 25°C

#### 3) Data pengujian kualitas minyak trafo menggunakan metode DGA

Tabel 1. Hasil pengujian kandungan isolasi minyak

Hasil pengujian isolasi minyak (ppm)								
Parameter Gas	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	TDCG
Nilai (ppm)	7	25	78	625	2	62	0	789

### 3.2 Analisa Perhitungan

#### 3.2.1 Kualitas minyak transformator unit 3

Analisis pengujian minyak dengan menggunakan metode DGA (*Dissolved Gas Analysis*) bertujuan untuk mengetahui gas-gas yang terlarut dalam minyak trafo yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi.

Tabel 2. Jenis kegagalan menurut analisis Key Gas

Jenis kegagalan menurut analisis Key Gas			
Jenis kegagalan	Gas Kunci	kreteria	Jumlah Gas
Arcing (Busur Api)	Asetilen ( $C_2H_2$ )	Kandungan $H_2$ dan $C_2H_2$ yang besar, kandungan $CH_4$ dan $C_2H_4$ yang sedikit.	$H_2 = 60\%$ $C_2H_2 = 30\%$
Korona	Hidrogen ( $H_2$ )	Kandungan gas $H_2$ yang besar, beberapa kandungan $CH_4$ , dengan sejumlah kecil nilai $C_2H_4$ dan $C_2H_6$	$H_2 = 85\%$ $CH_4 = 13\%$
Overheating of oil (pemanasan minyak)	Etilen ( $C_2H_4$ )	Kandungan gas $C_2H_4$ yang besar, sedikit kandungan $C_2H_6$ , beberapa kandungan $CH_4$ dan $H_2$	$C_2H_4 = 63\%$ $C_2H_6 = 20\%$
Overheating of cellulose (pemanasan isolasi kertas)	Karbon Monoksida (CO)	Sangat besar kandungan gas CO dan $CO_2$	CO = 92%

Menurut analisis *key gas*, hasil sampel penelitian yang diambil pada tanggal 10 April 2019 transformator unit 3 terindikasi *Overheating of cellulose* (pemanasan isolasi kertas) dengan menghasilkan kandungan CO dan  $CO_2$  lebih besar. Berdasarkan IEEE std. C57-104.2008 transformator kemungkinan akan timbul gejala kegagalan isolasi yang harus diwaspadai dengan ditandai TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) mulai tinggi nilainya. Namun transformator masih

layak beroperasi karena kandungan gas CO dan CO<sub>2</sub> masih dalam *range* aman serta kandungan gas yang lain masih dalam keadaan normal.

### 3.2.2 Umur transformator

Data pembebanan pada transformator unit 3 di gardu induk pemalang tanggal 29 Maret 2019 mengalami pembebanan terbesar selama bulan Maret 2019. Penelitian ini penulis mengambil dua kondisi perbedaan waktu yaitu, pada siang jam 10.00 WIB dengan daya aktif sebesar 19,2 MW dan daya reaktif 5,4 MVAR serta pada malam jam 19.00 WIB dengan daya aktif 27,5 MW dan daya reaktif 5 MVAR. Untuk mendapatkan hasil perbandingan data yang diuji, maka dilakukan percobaan dengan menggunakan variasi pembebanan yaitu data beban jam 10.00 wib dan 19.00 wib.

#### a. Menentukan daya semu (S)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan,        S = daya semu (MVA)  
                   P = daya aktif (MW)  
                   Q = daya reaktif (MVAR)

Contoh perhitungan mencari daya semu pada jam 10.00 dengan diketahui daya aktif 19,2 Mw dan daya reaktif 5,4 Mvar.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{19,2^2 + 5,4^2} = 24,6 \text{ MVA (jam 10.00)}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{27,5^2 + 5^2} = 32,5 \text{ MVA (jam 19.00)}$$

#### b. Menentukan rasio pembebanan (K)

$$K = \frac{S}{S_r} \dots\dots\dots(2)$$

Dengan,        K        = Ratio pembebanan (%)  
                   S        = Beban transformator (MVA)  
                   S<sub>r</sub>       = Kapasitas transformator (MVA)

Contoh perhitungan menentukan rasio pembebanan

$$K = \frac{S}{S_r} = \frac{24,6}{36} = 68\% \text{ (jenis pendingin onan pada jam 10.00)}$$

$$K = \frac{S}{S_r} = \frac{24,6}{60} = 41\% \text{ (jenis pendingin onaf pada jam 10.00)}$$

Dengan perhitungan menggunakan persamaan (2), maka dapat ditentukan hasil pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan rasio pembebanan

Rasio pembebanan (%)		
Jam	Pendingin ONAN	Pendingin ONAF
10.00	68	41
19.00	90	54

c. Menentukan rugi tembaga ( $P_{cu}$ )

$$P_{cu} = I^2 R \dots\dots\dots(3)$$

Dengan,  $P_{cu}$  = rugi tembaga (Watt)

$I$  = arus (Ampere)

$R$  = resistansi (Ohm)

Diketahui data arus belitan primer dan belitan sekunder pada penelitian tanggal 29 Maret 2019 pada tabel 4.

Tabel 4. Data arus pada tanggal 29 Maret 2019.

Arus pada transformator (Ampere)		
	Jam 10.00	Jam 19.00
I belitan primer fasa R	86	122
I belitan primer fasa S	86	122
I belitan primer fasa T	86	122
I belitan sekunder fasa R	585	841
I belitan sekunder fasa S	568	827
I belitan sekunder fasa T	572	834

Data tabel 3 merupakan data arus pada kumparan primer dan kumparan sekunder yang ada di transformator unit 3 dengan pengambilan data pada tanggal 29 Maret 2019 dalam kondisi waktu yang berbeda, yaitu siang jam 10.00 wib dan malam jam 19.00 wib. Diketahui pada transformator unit 3 memiliki nilai resistansi 12,77%, dikarenakan nilai resistansi masih dalam satuan persen maka perlu dihitung nilai sesungguhnya.

$$Z_{\text{sesungguhnya}} = Z_{pu} \times Z_{\text{dasar}} \dots\dots\dots(4)$$

$$Z_{\text{dasar}} = \frac{(Kv)^2}{MVA} \dots\dots\dots(5)$$

$$Z_{\text{dasar}}(\text{belitan Primer}) = \frac{(Kv)^2}{MVA} = \frac{\left(\frac{150}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{60}{3}} = \frac{22.500}{20} = \frac{7.500}{20 A} = 375 \Omega$$

$$Z_{\text{dasar}}(\text{belitan sekunder}) = \frac{(Kv)^2}{MVA} = \frac{\left(\frac{20}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{60}{3}} = \frac{400}{20} = \frac{133,3 V}{20 A} = 6,67 \Omega$$

$$Z_{\text{sesungguhnya}}(\text{belitan primer}) = Z_{\text{pu}} \times Z_{\text{dasar}} = 12,77\% \times 375 = 47,8 \Omega$$

$$Z_{\text{sesungguhnya}}(\text{belitan sekunder}) = Z_{\text{pu}} \times Z_{\text{dasar}} = 12,77\% \times 6,67 = 0,8 \Omega$$

Menurut perhitungan dengan menggunakan persamaan (4) dapat diketahui nilai resistansi belitan primer 47,8  $\Omega$  dan pada belitan sekunder 0,8  $\Omega$ .

Diketahuinya nilai Z sesungguhnya dan I (arus) pada masing-masing belitan fasa maka dapat dihitung rugi tembaga dengan menggunakan persamaan (3).

Perhitungan rugi tembaga belitan primer fasa R pada jam 10.00 WIB.

$$P_{\text{cu}} = I^2 R = 86^2 \times 47,8 = 4.118,3 \text{ W}$$

Perhitungan rugi tembaga belitan sekunder fasa R pada jam 10.00 WIB.

$$P_{\text{cu}} = I^2 R = 585^2 \times 0,8 = 498,2 \text{ W}$$

Tabel 5. Hasil perhitungan rugi tembaga pada transformator unit 3

Rugi tembaga pada transformator unit 3 (Watt)		
	Jam 10.00	Jam 19.00
Rugi tembaga belitan primer fasa R	4.118,3	5.842,2
Rugi tembaga belitan primer fasa S	4.118,3	5.842,2
Rugi tembaga belitan primer fasa T	4.118,3	5.842,2
Rugi tembaga belitan sekunder fasa R	498,2	716,3
Rugi tembaga belitan sekunder fasa S	483,7	704,4
Rugi tembaga belitan sekunder fasa T	487,2	710,3
Jumlah	13.824,2 W	19.657,9 W
	13,8 kW	19,6 kW

Hasil data perhitungan rugi tembaga pada jam 10.00 wib dan 19.00 wib tersebut dijadikan sebagai acuan perbandingan. Diketahui rugi tembaga pada jam 10.00 wib = 13,8 kW dan jam 19.00 = 19,6 kW.

d. Menghitung perbandingan rugi transformator (d)

$$d = \frac{\text{Rugi tembaga pada daya pengenalan}}{\text{Rugi beban nol}} \dots\dots\dots(6)$$

Berdasarkan hasil jumlah rugi tembaga pada jam 10.00 wib = 13,8 kW dan rugi tembaga pada jam 19.00 wib = 19,6 kW, serta rugi beban nol 30 kW, maka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6).

$$d = \frac{13,8 \text{ KW}}{30 \text{ KW}} = 0,46 \text{ (jam 10.00)}$$

$$d = \frac{19,6 \text{ KW}}{30 \text{ KW}} = 0,65 \text{ (jam 19.00)}$$

e. Menghitung kenaikan temperatur ultimate top oil ( $\Delta\theta_b$ )

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left( \frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x \dots\dots\dots(7)$$

Dengan,  $\Delta\theta_b$  = kenaikan temperatur top oil pada beban stabil

$\Delta\theta_{br}$  = 55°C untuk ON

40°C untuk OFF

\*menurut publikasi IEC 76 (1967) pada spesifikasi sub bab 41.7.1 mengikuti tabel tunggal diatur pada kedua jenis pendingin.

d = perbandingan rugi transformator

k = ratio pembebanan

x = 0,9 (ONAN dan ONAF)

1,0 (OFAF dan OFWF)

Contoh perhitungan kenaikan temperatur ultimate top oil ( $\Delta\theta_b$ ) dengan menggunakan persamaan (7) dengan mode ONAN.

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left( \frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x = 55 \left( \frac{1+0,46 \times 0,68^2}{1+0,46} \right)^{0,9} = 55 \left( \frac{1,2}{1,46} \right)^{0,9} = 46,1 \text{ } ^\circ\text{C (jam 10.00)}$$

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left( \frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x = 55 \left( \frac{1+0,65 \times 0,9^2}{1+0,65} \right)^{0,9} = 55 \left( \frac{1,5}{1,65} \right)^{0,9} = 50,4 \text{ } ^\circ\text{C (jam 19.00)}$$

Tabel 6. Hasil perhitungan kenaikan temperatur ultimate top oil

Kenaikan temperatur ultimate top oil (°C)		
Jam	Pendingin ONAN	Pendingin ONAF
10.00	46,1	41,2
19.00	50,4	40,1

Menurut hasil perhitungan kenaikan temperatur top oil pada table 6, dimana ONAN mempunyai kenaikan temperatur top oil tertinggi sebesar 50,4°C pada jam 19.00, sedangkan ONAF temperatur top oil tertinggi sebesar 41,2°C pada jam 10.00. Hal ini karena di pengaruhi oleh rugi transformator dan pembebanan. Besarnya rugi transformator dan pembebanan akan berbanding lurus terhadap kenaikan temperatur top oil untuk ONAN, sedangkan ONAF Besarnya rugi transformator akan berbanding lurus dan pembebanan berbanding terbalik terhadap kenaikan temperatur top oil.

f. Menghitung kenaikan temperatur top oil ( $\Delta\theta_{on}$ )

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_b - \Delta\theta_{o(n-1)}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \dots \dots \dots (8)$$

Dengan,  $\Delta\theta_{o(n-1)}$  = kenaikan temperatur awal minyak

t = waktu dalam jam

$\tau$  = konstanta minyak dalam jam

$\tau = 3$  ONAN dan ONAF

$\tau = 2$  OFAF dan OFWF

Contoh perhitungan menentukan kenaikan temperatur top oil

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{on} &= \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_b - \Delta\theta_{o(n-1)}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \\ &= 46,1 + (46,1 - 46,1) \left(1 - e^{-\frac{1}{3}}\right) = 46,1 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (jam 10.00)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{on} &= \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_b - \Delta\theta_{o(n-1)}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \\ &= 50,4 + (50,4 - 50,4) \left(1 - e^{-\frac{1}{3}}\right) = 50,4 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (jam 19.00)} \end{aligned}$$

Tabel 7. Hasil perhitungan kenaikan temperatur top oil

Kenaikan temperatur top oil (°C)		
Jam	Pendingin ONAN	Pendingin ONAF
10.00	46,1	41,2
19.00	50,4	40,1

- g. Menghitung selisih antara kenaikan rata-rata temperatur minyak dengan kenaikan rata-rata temperatur kumparan ( $\Delta\theta_{wo}$ )

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m \dots\dots\dots(9)$$

Dengan,  $\Delta\theta_k$  = Kenaikan temperatur rata-rata kumparan(°C)

$\Delta\theta_m$  = Kenaikan rata-rata temperatur minyak(°C)

Dengan menggunakan data pada tabel 8 dapat dihitung selisih antara kenaikan rata-rata temperatur minyak dengan kenaikan rata-rata temperatur kumparan( $\Delta\theta_{wo}$ ), dengan menggunakan persamaan (9).

Tabel 8. Data pengukuran temperatur pada transformator unit 3

Temperatur kumparan dan minyak (°C)		
	Jam 10.00	Jam 19.00
Kenaikan temperatur rata-rata kumparan	55°C	60°C
Kenaikan temperatur top oil( $\Delta\theta_{br}$ ) menurut IEC 76	55°C	55°C
Kenaikan rata-rata temperatur minyak	52°C	58°C

Contoh perhitungan menentukan selisih antara kenaikan rata-rata temperatur minyak dengan kenaikan rata-rata temperatur kumparan ( $\Delta\theta_{wo}$ ).

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m = 55^\circ\text{C} - 52^\circ\text{C} = 3^\circ\text{C} \text{ (jam 10.00)}$$

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m = 60^\circ\text{C} - 58^\circ\text{C} = 2^\circ\text{C} \text{ (jam 19.00)}$$

- h. (Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak alami)

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,2 \Delta\theta_{wo} \dots\dots\dots(10)$$

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,2 \Delta\theta_{wo} = 55^\circ\text{C} + 1,2 \times 3 = 58,6^\circ\text{C} \text{ (jam 10.00)}$$

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,2 \Delta\theta_{wo} = 55^\circ\text{C} + 1,2 \times 2 = 57,4^\circ\text{C} \text{ (jam 19.00)}$$

- i. (Kenaikan temperatur hot spot dengan sirkulasi minyak paksa)

$$\Delta\theta_{cr(paksaan)} = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr(alami)} - \Delta\theta_b) \dots\dots\dots(11)$$



$$\Delta\theta_{cr(paksa)} = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr(alami)} - \Delta\theta_b) = 40 + (58,6 - 40) = 58,6^\circ\text{C}$$

(jam 10.00)

$$\Delta\theta_{cr(paksa)} = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr(alami)} - \Delta\theta_b) = 40 + (57,4 - 40) = 57,4^\circ\text{C}$$

(jam 19.00)

j. Menentukan selisih hot spot dengan top oil ( $\Delta\theta_{td}$ )

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} \dots\dots\dots(12)$$

dengan,  $\Delta\theta_{cr}$  = kenaikan temperatur hot spot

K = ratio pembebanan

$\Delta\theta_{br}$  = kenaikan temperatur top oil dengan standar IEC 76 ( $40^\circ\text{C}$ )

Konstanta (y) = 0,8 untuk ONAN & ONAF

0,9 untuk OFAF & OFWF

Contoh perhitungan menentukan selisih hot spot dengan top oil pada pembebanan 68% dan 90% mode ONAN dengan menggunakan persamaan (12).

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} = (58,6 - 40) \times (0,68)^{2(0,8)} = (18,6) \times (0,53) = 9,85^\circ\text{C} \text{ (jam 10.00)}$$

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})K^{2y} = (57,4 - 40) \times (0,9)^{2(0,8)} = (17,4) \times (0,84) = 14,6^\circ\text{C} \text{ (jam 19.00)}$$

Table 9. Hasil selisih hot spot dengan top oil

Selisih hot spot dengan top oil ( $^\circ\text{C}$ )		
Jam	Pendingin ONAN	Pendingin ONAF
10.00	9,85	4,46
19.00	14,6	6,4

Hasil perhitungan selisih temperatur hot spot dengan top oil dengan menggunakan persamaan (12). Dimana ONAN mempunyai selisih hotspot dengan temperatur tertinggi sebesar  $14,6^\circ\text{C}$  pada pembebanan 90%, sedangkan ONAF selisih hotspot dengan temperatur tertinggi sebesar  $6,4^\circ\text{C}$  pada pembebanan 54%. Besarnya hasil selisih hot spot dengan top oil akan berbanding lurus dengan temperatur kumparan, temperatur minyak, dan pembebanan.

k. Menentukan temperatur *hotspot* ( $\theta_c$ )

Dalam menentukan temperatur hotspot, suhu ambien (suhu lingkungan) sangat mempengaruhi nilai pada temperatur hotspot. Menentukan temperatur hotspot, suhu ambien (suhu lingkungan) sangat mempengaruhi nilai pada temperatur hotspot. Suhu *ambien* pada tanggal 29 Maret 2019 di gardu induk Pemalang, yaitu jam 10.00 sebesar 32°C dan jam 19.00 sebesar 25°C. Penelitian ini penulis membandingkan suhu ambien menurut IEC sebesar 20°C dan menurut IEEE 30°C (Berdasarkan standard IEEE C57.91 (1995) .

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \dots\dots\dots(13)$$

dengan,  $\theta_a$  = temperatur lingkungan (°C)

$\Delta\theta_{td}$  = selisih antara hotspot dengan top oil (°C)

$\Delta\theta_{on}$  = kenaikan temperatur top oil (°C)

Contoh perhitungan menentukan temperatur hotspot mode ONAN dengan menggunakan perbedaan rasio pembebanan, yaitu jam 10.00 sebesar 68% dan jam 19.00 sebesar 90% .

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} = 32^\circ\text{C} + 46,1^\circ\text{C} + 9,85^\circ\text{C} = 87,9^\circ\text{C} \quad (\text{jam 10.00})$$

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} = 25^\circ\text{C} + 50,4^\circ\text{C} + 14,6^\circ\text{C} = 90^\circ\text{C} \quad (\text{jam 19.00})$$

Tabel 10. Hasil perhitungan temperatur hotspot

Temperatur hotspot (°C)				
Suhu Sekitar	Pendingin ONAN		Pendingin ONAF	
	Jam 10.00	Jam 19.00	Jam 10.00	Jam 19.00
Sebenarnya jam 10.00 = 32°C 19.00 = 25°C	87,9	90	77,6	71,5
Menurut IEC = 20°C	75,9	85	65,6	66,5
Menurut IEEE = 30°C	85,9	95	75,6	76,5

Pengaruh suhu lingkungan(suhu ambien) sebagai pembanding menunjukkan bahwa hasil suhu lingkungan sesuai standard berbeda dengan suhu lingkungan yang ada di Indonesia. Namun hasil suhu hotspot yang pada tabel 10 menunjukkan keadaan baik, karena menurut IEC 76 yang diterbitkan tahun 1972, membatasi suhu

*hot spot* 140°C. Suhu lingkungan terbaik yaitu 20°C. Sampai 30°C dengan pembebanan maksimal untuk ONAN 70% dan ONAF 80%. Besarnya kenaikan suhu lingkungan (suhu *Ambien*) dan kenaikan temperatur top oil akan berbanding lurus terhadap kenaikan temperatur hotspot.

l. Menentukan laju penuaan thermal (X)

$$X = \frac{\text{Laju penggunaan umur saat } \theta_c}{\text{Laju penggunaan umur saat } \theta_{cr}}$$

$$X = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} \dots\dots\dots(14)$$

Persamaan (14) dapat disederhanakan dengan menggunakan log10 sebagai faktor pengali, maka akan menjadi persamaan.

$$X = 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19,93} \dots\dots\dots(15)$$

Dengan, X = laju penuaan thermal (jam)

$\theta_c$  = temperatur hotspot(°C)

$\theta_{cr}$  = kenaikan temperatur hotspot (98°C)

Contoh perhitungan menentukan laju penuaan thermal pembebanan 68% pada jam10.00 dan rasio pembebanan 90% pada jam 19.00 mode ONAN dengan menggunakan persamaan (15).

$$X = 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19,93} = 10^{(87,9 - 98)/19,93} = 10^{-0,55} = 0,28 \text{ jam} \quad (\text{jam 10.00})$$

$$X = 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19,93} = 10^{(90 - 98)/19,93} = 10^{-0,40} = 0,39 \text{ jam} \quad (\text{jam 19.00})$$

Tabel 11. Hasil perhitungan laju penuaan thermal

Laju penuaan thermal (Jam)				
Suhu Sekitar	Pendingin ONAN		Pendingin ONAF	
	Jam	Jam	Jam	Jam
	10.00	19.00	10.00	19.00
Sebenarnya jam 10.00 =32°C 19.00 = 25°C	0,28	0,39	0,09	0,04
Menurut IEC = 20°C	0,07	0,22	0,02	0,02
Menurut IEEE = 30°C	0,25	0,70	0,07	0,08

Menurut tabel 11 hasil perhitungan laju penuaan thermal dengan menggunakan persamaan (15), dimana ONAN mempunyai laju penuaan thermal

tertinggi sebesar 0,70 jam terjadi pada pembebanan 90% (ONAN) dengan suhu lingkungan 30°C, sedangkan ONAF laju penuaan thermal tertinggi sebesar 0,9 jam pada pembebanan 41% (ONAF) dengan suhu lingkungan 32°C. Besarnya kenaikan suhu lingkungan (suhu *Ambien*) dan kenaikan temperatur top oil akan berbanding lurus terhadap laju penuaan thermal.

m. Menentukan susut umur transformator (L)

$$L = \frac{X.T}{\text{periode waktu}} \dots\dots\dots(16)$$

dengan,        L = susut umur transformator (jam)  
                   X = laju penuaan thermal relative (jam)  
                   T = Periode pemakaian (tahun)

Contoh perhitungan menentukan susut umur transformator dengan pembebanan 68% dan pembebanan 90% pada mode ONAN dengan menggunakan persamaan (16).

$$L = \frac{X.T}{\text{periode waktu}} = \frac{0,28 \times 3}{1} = 0,84 \text{ jam} \quad (\text{jam 10.00})$$

$$L = \frac{X.T}{\text{periode waktu}} = \frac{0,39 \times 3}{1} = 1,17 \text{ jam} \quad (\text{jam 19.00})$$

Tabel 12. Hasil perhitungan susut umur transformator

Susut umur transformator (Jam)				
Suhu sekitar	Pendingin ONAN		Pendingin ONAF	
	Jam	Jam	Jam	Jam
	10.00	19.00	10.00	19.00
Sebenarnya jam 10.00 = 32°C 19.00 = 25°C	0,84	1,17	0,27	0,12
Menurut IEC = 20°C	0,21	0,66	0,06	0,06
Menurut IEEE = 30°C	0,75	2,1	0,21	0,24

Hasil perhitungan susut umur transformator pada tabel 12, dapat diketahui jika suhu *ambien* yang diambil adalah 30°C dengan pembebanan pada jam 10.00 dan jam 19.00, maka nilai susut umur akan tinggi berbanding lurus dengan kenaikan beban. Apabila pembebanan yang diambil pada jam 19.00 yaitu dengan mode ONAN sebesar 90% dan mode ONAF sebesar 54% dengan berbagai macam nilai

suhu *ambien*, maka dapat disimpulkan nilai susut umur transformator akan berbanding lurus dengan kenaikan *suhu ambien*. Faktor pembebanan, suhu lingkungan dan sistem pendingin sangat mempengaruhi susut umur transformator.

n. Perkiraan sisa umur transformator (n)

$$n = \frac{\text{umur dasar-lama trafo sudah terpakai}}{\text{susut umur}} \dots\dots\dots(17)$$

Contoh perhitungan menentukan perkiraan sisa umur transformator dengan pembebanan 68% pada dan pembebanan 90% mode ONAN dengan menggunakan persamaan (17).

$$n = \frac{20-3}{0,84} = 20,2 \text{ tahun} \quad (\text{jam } 10.00)$$

$$n = \frac{20-3}{1,17} = 14,5 \text{ tahun} \quad (\text{jam } 19.00)$$

Tabel 13. Hasil perhitungan perkiraan sisa umur transformator (tahun)

Perkiraan sisa umur transformator (tahun)				
Suhu sekitar	Pendingin ONAN		Pendingin ONAF	
	Jam	Jam	Jam	Jam
	10.00	19.00	10.00	19.00
Sebenarnya jam 10.00 = 32°C 19.00 = 25°C	20,2	14,5	62,9	141,6
Menurut IEC = 20°C	80,9	25,7	283,3	283,3
Menurut IEEE = 30°C	22,6	8	80,9	70,8

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 13 dengan menggunakan persamaan (17), dapat diketahui Mode ONAN pembebanan terbaik maksimal 68% dengan suhu *ambien* 20°C dan Mode ONAF pembebanan terbaik maksimal 54% dengan suhu *ambien* 20°C. Namun, dengan menggunakan data sebenarnya yang ada di gardu induk Pemalang transformator tidak beroperasi pada suhu *ambien* 20°C, agar umur transformator dapat berumur panjang dengan memperhatikan suhu di Indonesia yang kadang ekstrim maka harus diseimbangi dengan pembebanan yang rendah, maka dibuat beban maksimal sekitar 70% untuk mode ONAN dan beban maksimal sekitar 80% untuk mode ONAF.

#### 4. PENUTUP

Hasil penelitian pengaruh tahanan isolasi minyak akibat pembebanan terhadap susut umur transformator dengan pengambilan data di gardu induk pemalang 150kV dapat disimpulkan sebagai berikut :

- 1) Berdasarkan hasil pengujian minyak menggunakan metode DGA, transformator unit 3 terindeksi kandungan gas CO<sub>2</sub> sebesar 78% kemungkinan ada kegagalan isolasi yaitu pemanasan isolasi kertas (*overheating of cellulose*).
- 2) Berdasarkan penelitian temperatur hotspot untuk ONAN tertinggi 90°C dan ONAF tertinggi 77,6°C, dimana kondisi ini transformator masih aman beroperasi karena berada dibawah batas maksimum yang ditetapkan IEC345 tahun 1991 yaitu sebesar 98°C untuk transformator mengalami umur yang normal.
- 3) Terlihat bahwa suhu lingkungan sangat mempengaruhi faktor percepatan susut umur transformator, dengan perbedaan suhu 32°C (suhu sebenarnya), suhu 20°C (standard IEC), suhu 30°C (standard IEEE) dan suhu sebenarnya 32°C (jam 10.00) dan suhu sebenarnya 25°C (jam 19.00).
- 4) Berdasarkan perbandingan suhu standard IEC 20°C dengan suhu di Indonesia terlihat susut umur transformator berkurang 25% pada jam 10.00 dan 56% pada jam 19.00 untuk pendingin ONAN, sedangkan pendingin ONAF susut umur transformator berkurang 22% pada jam 10.00 dan pada jam 19.00 berkurang 50%.
- 5) Perkiraan umur transformator paling lama sebesar 283,3 tahun pada pembebanan 41% untuk jam 10.00 dan jam 19.00 dengan pembebanan 54% suhu *ambien* 20°C.
- 6) Terlihat jelas bahwa pengaruh pendingin ONAN/ONAF dalam pengoperasian transformator dapat meminimalisir faktor suhu lingkungan dan pembebanan yang mengakibatkan susut umur transformator.

## **PERSANTUNAN**

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak yang terlibat membantu pada penelitian ini sebagai berikut:

- 1) Terima kasih kepada Allah SWT dengan rahmat dan pertolongannya sehingga penulis dapat menyelesaikan mata kuliah ini.
- 2) Terima kasih kepada Nabi Muhammad SAW yang telah mengajarkan arti pentingnya mencari ilmu sehingga penulis termotivasi dengan apa yang diajarkannya.
- 3) Terima kasih kepada keluarga terutama Bapak dan Ibu serta kakak yang selalu mendoakan, memotivasi dan membantu dalam pembiayaan.
- 4) Terima kasih kepada Bapak Aris Budiman, S.T ,M.T selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan ilmunya dalam mata kuliah ini.
- 5) Terima kasih kepada Bapak dan Ibu dosen teknik elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah memberi banyak ilmu teori maupun praktek.
- 6) Terima kasih kepada Bapak Latif selaku supervisor gardu induk Pemalang 150kV yang telah memberikan ilmu dan data terkait penelitian ini.
- 7) Terima kasih kepada teman-teman seperjuangan angkatan 2015 yang telah menemani berjuang di dalam maupun diluar kelas dan membantu dalam segala hal.
- 8) Terima kasih kepada teman-teman seperjuangan di Badan Eksekutif Mahasiswa kabinet Bengawan Bakti 2017-2018 yang telah memberikan pelajaran dalam perjuangan tanpa mengenal rasa lelah.

## **DAFTAR PUSTAKA**

Adhie Satria Gianto, C.D. (2015). Perhitungan Penurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Suhu Lingkungan. *volume 13, halaman 15-36, ISSN 1412-0372. Universitas Trisakti.*

- Harlow, J. H. (2004). *Electrical Power Transformer Engineering*. United States of America: ISBN 0-8493-1704-5 CRC Press.
- IEC. (2005). Loading guide for oil-immersed Power Transformers, IEC Standard 60076-7, International Electrotechnical Commission, 2000-04 Edition : 12.
- IEEE. (2008). Guide For The Interpretation Of Gases Generated In Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.104. New York, NY 10016-5997, USA.
- Indian Standard, "Guide For Loading Of Oil Immersed Transformer," 1972.
- Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2004). *Transformer Engineering Design and Practice*. Bombay Mumbai India: Indian Institute of Technology.
- Muhammad Aidil Muzar, S. M. (2018). Analisis Pengaruh Suhu Akibat Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Di Gardu Induk Lambaro. *Jurnal Online Teknik Elektro e-ISSN: 2252-7036*.
- Setiawan, G. i. (2013). Analisis Kondisi Minyak Transformator Berdasarkan Uji Parameter Utama. *Universitas Indonesia*.
- Tanguy, A. (2004). Thermal Performance Of Power Transformers: Thermal Calculation Tools Focused On New Operating Requirements. 21, rue d'Artois, F-75008 Paris.